



ESTUDO DO NÚMERO DE REPETIÇÕES E DE DIFERENTES RESOLUÇÕES DE FATORIAIS COMPLETOS 2K SOBRE AS ESTIMATIVAS DOS EFEITOS DOS FATORES E DA INTERAÇÃO ENTRE ELES

Cristiane Alves Anacleto (UFV)
cristianeanelto@yahoo.com.br
Nerilson Terra Santos (UFV)
nsantos@dpi.ufv.br

O número de combinações e repetições tem um efeito direto no custo dos planejamentos fatorial completo e fracionário de forma que esse número deve ser o menor possível garantindo a realização e confiabilidade do experimento. A partir da simulação de um planejamento fatorial completo 2k com oito fatores e oito repetições, retirou-se observações que satisfizessem à obtenção de alguns planejamentos fatoriais fracionários seguindo determinada resolução e corridas selecionadas ao acaso para formar outras frações. Verificou-se eficiência dos planejamentos fracionários e dos sorteios aleatórios utilizando o critério D de eficiência em relação ao planejamento fatorial completo. Realizou-se também uma análise de variância para todas as frações. Para o conjunto de dados analisados verificou-se que a eficiência das frações se reduzia à medida que o número de combinações diminuía e os efeitos que foram significativos no planejamento fatorial completo tomado como base, permaneceram significativos nas frações aleatórias quanto nas não-aleatórias. Os planejamentos fatoriais fracionários avaliados que seguem uma determinada resolução não carregam a mesma quantidade de informações que um fatorial completo e tem valores de eficiência bastante similares aos planejamentos fatoriais fracionários selecionados ao acaso. Palavras chave: planejamento fatorial completo e fracionário, eficiência de planejamentos, resolução

Palavras-chaves: Planejamento Fatorial Completo e Fracionário, Eficiência de Planejamentos, Resolução

1. Introdução

No contexto econômico atual as indústrias têm se preocupado em fornecer ao seu mercado consumidor produtos com qualidades como forma estratégica de sobrevivência devido a grande necessidade de se manterem no mercado e alcançar o mesmo padrão de qualidade fornecido por seus concorrentes. Estudos sobre a qualidade de produtos finais de um processo industrial, revelam que para obter um produto com características desejadas pelo consumidor, é necessário que o respectivo processo produtivo esteja sob permanente controle.

Diz-se que um processo industrial está fora de controle quando um ou mais fatores de um processo produtivo causam variabilidade em uma ou mais características avaliadas no produto final. Alguns métodos estatísticos podem ser utilizados para verificar quais fatores de um processo industrial ocasionam esta variabilidade indesejada e conseqüentemente diminuem o rendimento do processo industrial.

Entretanto, inicialmente em cada processo industrial é necessário identificar quais são os fatores que tem efeito significativo nas características (variáveis respostas) relacionadas à qualidade do produto. Para tal é necessário um experimento planejado de forma que todos os fatores, a princípio com grande efeito, e seus respectivos níveis possam ser investigados. Assim, ao final do experimento os fatores e os respectivos níveis com efeitos significativos no processo industrial são identificados.

O planejamento de um fatorial completo pressupõe que todas as combinações possíveis entre os níveis dos fatores aparecem pelo menos duas vezes no experimento. Tal experimento permite avaliar a significância de cada um dos efeitos principais bem como o efeito das interações entre os fatores na variável resposta. No entanto, dependendo do número de fatores em teste e do número de níveis de cada fator, o custo deste tipo de planejamento é muito elevado. Para diminuir este custo, o pesquisador pode usar outros tipos de planejamentos, os quais além de apresentarem eficiência semelhante ao de um fatorial completo, também permitem avaliar a maioria dos efeitos principais e também as interações de maior importância.

A primeira opção para reduzir custos, seria avaliar cada fator em apenas dois níveis. Esse tipo de planejamento, conhecido como 2^k funciona como um experimento de seleção, pois possibilita investigar vários fatores com poucos níveis. Neste caso, os fatores identificados relevantes no processo são investigados mais profundamente em experimentos posteriores.

Porém, o planejamento fatorial 2^k , apesar de ser muito utilizado em controle de qualidade de processos, apresenta alguns inconvenientes. À medida que se aumenta o número de fatores, o número de possíveis combinações entre os fatores também aumenta. Testar todas estas possíveis combinações pode ser inviável, pois muitos processos industriais são parados para realizar tais experimentos.

Para evitar testar todas as combinações, o pesquisador pode testar apenas uma fração de um fatorial 2^k , ou seja, planejar um fatorial fracionário. Nesse planejamento somente os efeitos principais dos fatores e das interações entre os fatores, de ordem inferior, podem ser avaliados. Partindo-se de um planejamento fatorial 2^k , é possível escolher diferentes frações. A diferença entre as frações está basicamente em quais combinações entre os fatores serão testadas. As combinações testadas irão determinar quais efeitos (principais e interações) que poderão ter os seus efeitos avaliados sem confundimento no experimento. Devido a isto a cada fração de um fatorial 2^k é associada uma classificação quanto a sua resolução. Esta

classificação define quais efeitos podem ser estimados no experimento.

O número de repetições também tem um efeito direto no custo de um planejamento experimental. Mesmo que se reduza o número de combinações a ser testado usando um fatorial fracionário é necessário que cada combinação ou algumas combinações sejam testadas um determinado número de vezes no experimento. Portanto, é desejável que se use o menor número possível de repetições.

Ao visar à redução de custos diminuindo tanto as combinações a serem testadas bem como o número de repetições, o pesquisador não pode perder de vista a razão da realização do experimento que é avaliar com eficiência o efeito dos fatores e da interação entre eles sobre as variáveis que determinam a qualidade de um produto final. Este trabalho teve como objetivo comparar a eficiência de diferentes frações em diferentes resoluções em diversos números de repetições em relação a um fatorial completo com número razoável de repetições.

2. Revisão de Literatura

2.1. Qualidade em processos produtivos

O novo cenário atual exige uma atitude competitiva de qualquer setor da economia e para isso as empresas necessitam ter como alvo os seus clientes (SHIEFFER, 1994). Para Silva Jr (2003), os consumidores de décadas passadas eram exigentes e o mercado estava em expansão, já os consumidores dessa nova década são mais exigentes e contam com meios legais na defesa de seus direitos.

Para Oliveira & Muniz (2000), qualidade consiste na conformidade dos produtos finais com as expectativas dos consumidores. TTTI - Madras (1990) diz que “para conseguir qualidade é essencial que todo o processo de fabricação, desde a aquisição da matéria-prima até o estágio em que o produto final alcance os consumidores, contribua para a qualidade do produto”.

A *American Society for Quality* ressalta que a busca da qualidade deve mudar, tornar-se mais inovadora, flexível e rápida na implementação das soluções eficazes que conduzam a resultados nos negócios e reflitam os desejos do consumidor. Qualidade está intimamente ligada à competitividade, pois segundo Oliveira e Muniz (2000) “a estratégia de competir com qualidade consiste em planejar, analisar e controlar a qualidade, para garantir que esta contribua para o fluxo de caixa, traga retorno de investimento e benefício geral para o negócio. Melhoria de qualidade pode providenciar crescimento nos negócios e aumento de posição competitiva para a empresa ao mesmo tempo, melhorias de qualidade são frequentemente acompanhadas por redução em custo”.

Para uma empresa se manter no mercado atual é necessário garantir que o seu processo de fabricação seja o mais eficaz possível e altamente controlado já que os processos de fabricação que não são controlados muitas vezes resultam em produtos com uma alta variabilidade. Segundo Werkema (1995), no processo de fabricação de um produto (bem ou serviço), atuam diversos fatores que afetam suas características da qualidade de forma que o processo pode ser visualizado como um conjunto de causas de variação. Estas causas provocam as mudanças nas diversas características da qualidade dos produtos, o que poderá dar origem aos produtos defeituosos. Dessa forma o controle de qualidade dos processos torna-se importante.

Segundo Montgomery (2005), para atingir uma melhor eficácia dos processos, as causas dos defeitos dos produtos e erros dos processos devem ser investigadas a fundo de forma que a coleta de dados, análise e posterior interpretação, acelerem o processo, ou seja, torne o processo rápido, reduza o custo de operação e elimine todas as causas de erros e defeitos.

2.2 Controle estatístico da qualidade

Os métodos estatísticos são muito úteis para o controle da qualidade de bens e serviços. Por este motivo o conhecimento destes métodos está se tornando cada vez mais importante para os profissionais responsáveis pelos programas de controle de qualidade dos processos produtivos (WERKEMA, 1995). Dados da história da qualidade revelam que a estatística assumiu um papel importante nas empresas, pois através de suas técnicas de planejamento, métodos e ferramentas de controle de qualidade é possível tomar decisões dentro da organização, de forma a contribuir para a melhoria contínua dos produtos e processos de fabricação. Segundo Juran *et al.* (1990), a maior parte das decisões tomadas quanto ao controle de qualidade tem suas bases em métodos estatísticos.

Para Werkema (1995) “a Estatística trata da coleta de dados informativos e da interpretação destes dados, facilitando o estabelecimento de conclusões confiáveis sobre algum fenômeno que esteja sendo estudado”. Os métodos estatísticos proporcionam um meio muito eficaz para o desenvolvimento de novas tecnologias e controle de qualidade em processos de manufatura (CAMPOS, 1992).

2.2.1. Planejamento de Experimentos

Segundo as tendências do contexto atual, cabe a empresa planejar um experimento para garantir a qualidade em todos os sentidos dos processos. Um experimento planejado é um teste ou uma série de testes no qual se induz mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada (inputs) do processo ou sistema, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saída. Galdámez (2002), e Juran (1990) definiram experimento como sendo um "determinado curso de ação destinado a responder a uma ou mais questões cuidadosamente elaboradas".

Segundo Montgomery (1991) as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para:

- Melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação;
- Melhorar o rendimento do processo;
- Reduzir o tempo de projeto, desenvolvimento e do custo de operação;
- Reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos, etc);
- Melhorar a qualidade industrial e a produtividade;
- Melhorar o desempenho do produto final;

Segundo Galdámez (2002), experimentos industriais são realizados pelas empresas no intuito de melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação. Experimentos são úteis também em projetos de produtos, de maneira que produtos novos sejam desenvolvidos e os já existentes aperfeiçoados. Planejamento de experimentos é realizado com o intuito de encontrar níveis ótimos dos parâmetros que regulam seus processos de fabricação

Segundo Montgomery & Runger (2003), cada experimento envolve uma seqüência de atividades:

- Conjectura: a hipótese original que motiva o experimento;
- Experimento: o teste feito para investigar a conjectura;
- Análise: a análise estatística dos dados do experimento;
- Conclusão: o que se aprendeu acerca da conjectura original do experimento.

2.2.2 Planejamento Fatorial

Um planejamento fatorial é geralmente usado quando se tem necessidade de se avaliar o efeito de diversos fatores e identificar qual dentre eles influi significativamente em uma ou mais variáveis de um processo produtivo que pode ser número de peças defeituosas, quantidade final de um produto, entre outras. Para Montgomery & Runger (2003) “É o planejamento em que cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas.”

Segundo Button (2001), o planejamento fatorial é indicado para a fase inicial do procedimento experimental quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável resposta escolhida. O autor ressalta ainda que o planejamento fatorial tem como base um modelo de efeitos fixos, pois as conclusões obtidas se aplicam apenas aos níveis dos fatores avaliados no experimento.

Segundo Montgomery & Runger (2003), os planejamentos fatoriais são usados em diversas áreas tais como: identificação de dificuldades do processo, desenvolvimento e utilização de ótimos em processos, avaliação de materiais e alternativas em desenvolvimento de novos produtos e processos, confiabilidade e teste de durabilidade, teste de desempenho, configuração de projeto de produto, determinação da tolerância de componentes, controle de processos produtos, proporciona o conhecimento a fundo dos processos e sistemas, avaliação das características do produto final, entre outras.

Segundo Montgomery (2005), quando os fatores são organizados em um planejamento fatorial, eles são frequentemente chamados de cruzados de forma que esses planejamentos são mais eficientes que experimentos que testam um fator por vez. Além disso, esse tipo de planejamento é importante quando interações podem estar presentes, de modo a evitar conclusões errôneas e permitem estimar os efeitos de um fator em vários níveis de outros fatores, produzindo conclusões que são válidas por via de uma extensa condição experimental. Ele ressalta ainda que vários casos do planejamento fatorial são importantes porque eles são amplamente usados em trabalhos de pesquisa e também porque eles formam a base de outros planejamentos de considerável valor prático.

2.2.3. Planejamento Fatorial 2^k

Geralmente quando existem muitos fatores que podem estar influenciando as variáveis de interesse, testam-se apenas dois níveis de cada fator. Neste caso, cada um dos k fatores de interesse tem somente dois níveis. Sendo assim, cada repetição de tal planejamento tem exatamente 2^k testes experimentais ou corridas. Estes planejamentos geralmente são chamados de planejamentos fatoriais 2^k .

O planejamento 2^k é particularmente útil em estágios iniciais de trabalho experimental, quando muitos fatores são prováveis de serem investigados e são amplamente usados em experimentos de seleção de fatores (MONTGOMERY, 2005). Ele ainda ressalta que todos os planejamentos 2^k são ortogonais porque seus contrastes para estimar os efeitos dos fatores e interações são ortogonais.

2.2.4. Planejamento Fatorial Fracionário 2^{k-1}

Um delineamento de fatorial fracionário 2^k contém 2^{k-p} experimentos (ou combinações) e são chamados como $1/2^p$ frações de 2^k , ou simplesmente 2^{k-p} delineamento fatorial fracionário. Esses delineamentos requerem a seleção de p geradores independentes. Os experimentos fatoriais fracionários têm grande aplicação nas indústrias (SOUZA, 1999).

Os planejamentos fatoriais fracionários 2^{k-1} são planejamentos fatoriais onde o número de

corridas são frações de um planejamento fatorial 2^k , de forma que interações entre vários fatores possam ser descartadas para estimarem-se somente interações entre poucos fatores e os efeitos principais dos fatores sobre a variável resposta. Planejamento fatorial fracionário permite a redução dos custos, otimização do tempo e agilização dos resultados.

Segundo Box *et al.* (1987) apud Ferreira (2003) os planejamentos fatoriais fracionados são úteis nas etapas iniciais de desenvolvimento de processos, já que esses planejamentos são muito interessantes em termos qualitativos, mas é importante ressaltar que devido aos seus efeitos principais confundir-se com interações de 2ª e 3ª ordem ou superiores, conforme o tipo de resolução fracionária não se deve otimizar um processo a partir deles.

Segundo Ferreira (2003) os fatoriais fracionários apresentam algumas características importantes: os efeitos principais dos fatores podem se misturar com os efeitos de interações que podem ser de segunda, terceira ou de outras ordens dependendo da resolução e também os efeitos das interações podem se misturar entre si, o que pode ser obtido através dos contrastes.

Para Barros Neto *et al.* (1996) apud Ferreira (2003) o planejamento fracionário representa um subconjunto do fatorial completo. A primeira consequência desse procedimento é obviamente tornar idênticos alguns efeitos (contraste). As relações entre os vários contrastes são obtidos a partir da expressão definidora do fracionamento, conhecida como geratriz, ou relação geradora, do fatorial fracionário.

Com a fragmentação do planejamento fatorial completo em fracionário, consegue-se estudar mais fatores com menos ensaios; obviamente existe um certo número máximo de variáveis que pode ser investigado. Quando esse limite é alcançado, diz-se que o planejamento está saturado. (BOX *et al.* 1987 apud FERREIRA 2003).

Nos planejamentos fatoriais fracionários deve-se tomar cuidado ao analisar os efeitos, pois na verdade analisa-se contrastes, que, portanto, confundem os efeitos. Para Stremel *et al.* (2000) um dos grandes problemas do fatorial fracionário é a hipótese implícita que as interações de alta ordem não interessam, mas às vezes são significativas. De certa forma, em projetos fatoriais fracionários, interações de alta ordem, particularmente escapam à detecção.

2.3 Critérios para avaliar a eficiência dos planejamentos

Considerando o modelo linear $y=X\beta + e$ onde y é um n componente do vetor coluna de observações, X é uma matriz $n \times p$ de elementos conhecidos, β é uma vetor $p \times 1$ de parâmetros desconhecidos e e é um n componente do vetor dos componentes residuais aleatórios com $E(e)=0$ e $D(e)=\sigma^2I$, onde E e D significam o operador esperança e a matriz de dispersão, respectivamente. O sistema de equações normais baseada no método de mínimos quadrados ordinários para estimar β é $X'X\beta=X'y$.

A tarefa de construção de planejamentos experimentais consiste na escolha de n linhas de X a partir de N linhas candidatas, tal que a matriz de informação resultante $X'X$ seja considerada ótima segundo um critério.

Existem vários critérios que podem ser utilizados para avaliar se um planejamento é ótimo. O mais amplamente usado é o critério D . Computacionalmente construídos, os planejamentos experimentais que apresentam o melhor valor para o critério D - ótimo, ou seja, são D -eficientes, começaram a se tornar populares em engenharia na década de 60 (FEDEROV 1972; MEYER and NACHTSHEIM 1995).

No começo dos anos 90, planejamentos D -eficientes foram introduzidos por pesquisadores de mercado. Desde então, planejamentos D -eficientes vêm sendo utilizados em estudos de

planejamento de produtos (KUHFIELD & TOBIAS, 2005).

D-eficiência é uma função do determinante da matriz de informação do planejamento, tipicamente escalonada relativa a mesma função de um planejamento ortogonal, balanceado e expressa em unidades de porcentagem.

Um planejamento é dito ser D - ótimo se o valor do determinante da inversa da matriz $(X'X)$ é minimizado, ou seja, é o planejamento que apresenta valor mínimo para $| (X'X)^{-1}|$. Isso significa que um planejamento D - ótimo minimiza o volume de associação da região de confiança no vetor de coeficientes da regressão (KUHFIELD & TOBIAS, 2005).

Uma medida da eficiência relativa de um planejamento 1 em relação a um planejamento 2 de acordo com o critério D é dada por:

$$De = (| (X_2'X_2)^{-1}| / | (X_1'X_1)^{-1}|)^{1/p}$$

Onde X_1 e X_2 são as matrizes para os dois planejamentos e p é o número de parâmetros do modelo (MONTGOMERY, 2005).

Em casos que o planejamento ideal para minimizar os critérios de otimidade não é conhecido, um algoritmo de base computacional pode ser empregado para encontrar tal planejamento. Esses algoritmos realizam permutações e adições de combinações em um planejamento inicial tomado como base pelo experimentador até que se encontre um planejamento ótimo, ou seja, aquele planejamento que possua as combinações ideais para que determinado critério de otimidade seja otimizado (MITCHELL, 1974).

3. Objetivos

O objetivo geral desse estudo foi verificar a acurácia dos resultados obtidos na pesquisa anterior e o efeito da redução do número de corridas e das combinações de tratamentos em experimentos fatoriais 2^k . Especificamente objetivou-se avaliar:

- a) A eficiência de experimentos fatoriais 2^k em diferentes números de repetições;
- b) A eficiência de experimentos fatoriais 2^k com uma repetição;
- c) A eficiência de experimentos fatoriais 2^{k-p} fracionários com diferentes tipos de resoluções;
- d) A eficiência de planejamentos com a seleção aleatória das combinações a serem corridas no experimento.

4. Metodologia

O planejamento fatorial completo 2^k , com oito fatores e com oito repetições, simulado a partir do módulo ADX do software SAS (2005) e as suas respectivas frações: $1/2$ fração com 1024 combinações, $1/4$ fração com 512 combinações, $1/8$ fração com 256 combinações, $1/16$ fração com 128 combinações e $1/32$ fração com 64 combinações, também geradas pelo software SAS (2005), foram utilizadas para a avaliação dos efeitos e interações sobre a variável resposta e para a avaliação dos resultados obtidos anteriormente na primeira fase da pesquisa.

Para verificar tais efeitos, foram realizadas análises de variância (ANOVA) utilizando o proc GLM do SAS (SAS, 2005) de todos os planejamentos citados acima para avaliar se as interações que foram consideradas como significativas no planejamento fatorial completo 2^k , com oito fatores e com oito repetições, permaneceram também como significativas nas frações.

Avaliou-se também se as interações que apresentaram como significativas no planejamento fatorial completo planejamento fatorial completo 2^k , com oito fatores e com oito repetições,

permaneceram também como significativas nas frações com o mesmo número de combinações que foram sorteadas ao acaso corridas tal que o seu número fosse igual ao dos fatoriais fracionários gerados pelo software SAS e citados anteriormente. A avaliação dessas frações foi realizada também utilizando o proc GLM do SAS (SAS, 2005).

A eficiência das frações tanto geradas pelo SAS quanto pelos sorteios aleatórios foram encontradas de acordo com o critério D de otimidade. Para encontrar os seus valores foi seguida passo a passo a equação para encontrar o valor da eficiência D tendo como base o planejamento fatorial completo 2^k , com oito fatores e com oito repetições.

5. Resultados

Após realizar o método de obtenção do valor da eficiência D passo a passo no SAS, verificou-se que seus valores foram decrescendo à medida que o número de combinações das frações foi reduzido tanto para as frações não-aleatórias quanto para as frações formadas pelas combinações sorteadas aleatoriamente a partir do planejamento fatorial completo 2^k com oito fatores e oito repetições. A Tabela 1 apresenta os valores encontrados para a eficiência D nos planejamentos avaliados.

| Seleção | Fração* | | | | |
|---------------|---------|-------|-------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Não-aleatória | 50,00 | 25,00 | 12,50 | 6,25 | 3,13 |
| Aleatória | 49,55 | 24,3 | 11,67 | 5,65 | 2,01 |

Tabela I – Valores de D-efficiency para as frações não-aleatórias e aleatórias

* Fração: 1 conteve 1024 combinações, 2 conteve 512 combinações, 3 conteve 256 combinações, 4 conteve 128 combinações e 5 conteve 64 combinações.

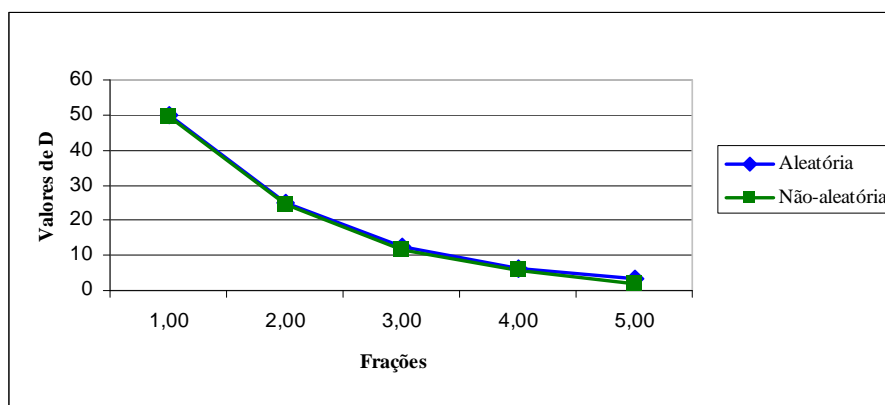


Figura 1 – Gráfico valores de D versus Frações

Os mesmos efeitos que foram significativos no planejamento fatorial completo 2^k , com oito fatores e com oito repetições, se mantiveram constantes nas demais frações tanto para as geradas pelo SAS quanto para as formadas com as combinações aleatórias, fato observado na análise de variância realizado pelo proc GLM do SAS (SAS, 2005). Vale ressaltar que para todas as análises de variância o grau de liberdade foi igual a um.

6. Conclusão

Para o conjunto de dados analisados, percebeu-se que a eficiência das frações foi diminuindo

à medida que o número de combinações diminuía, mesmo assim os efeitos que foram significativos no planejamento fatorial completo 2^k com oito fatores e oito repetições, tomado como base as análises de eficiência, permaneceram também significativos nas frações aleatórias quanto nas não-aleatórias. Outro fato observado na análise deste conjunto de dados foi a similaridade do valor da eficiência das frações aleatórias com o valor da eficiência das frações não-aleatórias.

Conclui-se que, os planejamentos fatoriais fracionários avaliados que seguem uma determinada resolução não carregam a mesma quantidade de informações que um fatorial completo. Além disso, os planejamentos fatoriais fracionários selecionados ao acaso tendem a apresentar eficiência bastante similar aos planejamentos fatoriais que seguem uma determinada resolução.

7. Referências Bibliográficas

ANNUAL QUALITY CONGRESS. (2000). *Foresight XXI*. Disponível em <<http://www.asq.org>> Consultado em 24 ago. 2005.

BARROS NETO, M.; SCARMINO, I. S.; BRUNS, R. E.. *Planejamento e Otimização de Experimentos*. 2ª ed..Campinas: editora da Unicamp, 1996.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. . *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. New York: John Wiley & Sons Inc, 1987

BUTTON, S. T.. *Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado*. São Paulo, Universidade Estadual de Campinas. (Apostila), 2001.

CAMPOS, V. F.. *Controle da Qualidade Total (No Estilo Japonês)*. 6ª ed. Rio de Janeiro: Bloch, Fundação Christiano Ottoni (Escola de Engenharia da UFMG), 1992.

FEDEROV, V. V. (1972). *Theory of Optimal Experiments*. Trad. e edit. Por W. J. Studden e E. M. Klimko. New York: Academic Press.

FERREIRA, A. A. *Abordagem estatística e computacional na otimização de meios de cultura para produção de antibióticos: o caso da cefalosporina C*. 215 p. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

GALDÁMEZ, E. V. C. . *Aplicação das Técnicas de Planejamentos e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos*. 121p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2002.

JURAN, J. M.; GRZYNA JR., F. M.; BINGHAM JR., R. S.. *Quality control handbook*. 3ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1990.

KUHFELD, W. F.; TOBIAS, R. D. . *Large Factorial Designs for Product Engineering and Marketing Research Applications*. *Technometrics*, v.47, n.2, p 132-157, May, 2005.

MEYER, R. K.; NACHTSHEIM, C. J.. *The Coordinate-Exchange Algorithm for Constructing Exact Optimal Experimental Designs*, *Technometrics*, v.1, p. 60-69, 1995.

MITCHELL, T. J.. *An algorithm for the construction of D-optimal designs*, *Technometrics*, v.20, p. 203-210, 1974

MONTGOMERY, D. C.. *Introduction to Statistical Quality Control*. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

MONTGOMERY, D. C. . *Design and analysis of experiments*, 5a ed. John Wiley: New York, 2005.

MONTGOMERY, D.C. & RUNGER, G. C.. *Estatística aplicação e probabilidade para engenheiros*. 2ed. São Paulo: editora LTC, 2003.

OLIVEIRA, M. S.; MUNIZ, J. A. . *Controle Estatístico e Gestão da Qualidade*. Lavras, Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, UFLA, 2000.

SHIEFER, G. . *Quality management in agriculture and food: management principles, system requirements, and*

development directions. Bonn: ILB – Verlag, 1994.

SILVA JR., A. G.. *ERU 580 – Gestão Ambiental e Qualidade no Agronegócio. MBA Agronegócio: Pós-Graduação “Latu Sensu” em Gestão do Agronegócio*. Viçosa: Departamento de Economia Rural da Universidade Federal de Viçosa, 99p. (Apostila), 2003.

SOUZA, O. A. . *Delineamento Experimental em Ensaios Fatoriais Utilizados em Preferência Declarada*. 135 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1999.

STREMEL, D. P.; FLORENCIO, J. A.; PONTAROLO, R.; FILHO, R. M. . *Análise e Otimização de Parâmetros de Modelos Cinéticos Estruturados pelo Projeto Fatorial Fracionário de Placket e Burman com Fatores a Dois Níveis*. XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 10p, 2000.

TTTI-MADRAS, Teachers Training Tecnology Institute. *Controle da Qualidade*. São Paulo: Mc Graw Hill, 1990

WERKEMA, M. C. C. . *As Ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos*. Volume 1 da série Ferramentas da Qualidade. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.